

Article, Published Version

**Sokoray-Varga, Béla; Höger, Verena; von Meltzer, Jonas; Prinz, Frederik; Weichert, Roman**

## **Durchfluss-Fließtiefen-Relation in Schlitzpässen**

BAWMitteilungen

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107294>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Sokoray-Varga, Béla; Höger, Verena; von Meltzer, Jonas; Prinz, Frederik; Weichert, Roman (2020): Durchfluss-Fließtiefen-Relation in Schlitzpässen. In: BAWMitteilungen 106. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 33-42.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



# Durchfluss-Fließtiefen-Relation in Schlitzpässen

Dr.-Ing. Béla Sokoray-Varga, Bundesanstalt für Wasserbau  
Dipl.-Ing. Verena Höger, Karlsruher Institut für Technologie  
Jonas von Meltzer M. Sc., Fichtner Water & Transportation GmbH  
Dipl.-Ing. Frederik Prinz, Dr. sc. techn. Roman Weichert,  
Bundesanstalt für Wasserbau

---

Im vorliegenden Artikel werden Untersuchungen vorgestellt, die an Versuchsrinnen der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) zum Thema der Durchflusskapazität von Schlitzpässen durchgeführt wurden. Die Untersuchungen hatten zum Ziel, die im DWA Merkblatt 509 (2014) empfohlenen Schlitzpassgeometrien für die an Bundeswasserstraßen auftretenden Verhältnisse hinsichtlich des Zusammenhangs von Durchfluss und Fließtiefe zu prüfen. Die Daten der KIT/BAW-Untersuchungen wurden mit dem in DWA (2014) beschriebenen Ansatz verglichen und ein neuer, einfacher Ansatz entwickelt. Die Ergebnisse bestätigen den in der Literatur beschriebenen linearen Zusammenhang zwischen Durchfluss und Fließtiefe für die an Bundeswasserstraßen praxisrelevanten Betriebsfälle. Der Ansatz nach DWA (2014) konnte nur teilweise durch die erhobenen Daten bestätigt werden. Auch wenn unabhängige Daten der TH Lübeck die Validität des neu entwickelten Ansatzes zeigen, sind weitere Messungen insbesondere an realisierten Anlagen erforderlich, um die Genauigkeit des Ansatzes auch unter Feldbedingungen zu prüfen.

spiel aus zur Verfügung stehender Energiehöhendifferenz zwischen Ober- und Unterwasser und den hydraulischen Verlusten in der Fischaufstiegsanlage zum Ausdruck (Bild 1). Die verlässliche Bestimmung des Betriebsdurchflusses ist dabei für verschiedene Aspekte relevant. So ist es beispielsweise für die Frage der Auffindbarkeit einer Fischaufstiegsanlage wichtig zu wissen, wie groß der Betriebsdurchfluss ist, da nur so berechnet werden kann, ob und wenn ja, wieviel Wasser zur Erzeugung einer hinreichenden Leitströmung im Unterwasser der Fischaufstiegsanlage hinzugegeben werden muss.



Bild 1: Strömungsablösungen an den Einbauten im Bereich der Trennwand eines Schlitzpässes

## 1 Einleitung

Der Betriebsdurchfluss  $Q$  und die Fließtiefe  $h$  sind fundamentale Größen für die Bemessung einer Fischaufstiegsanlage. Der Zusammenhang zwischen dem Durchfluss  $Q$  und der Fließtiefe  $h$  bringt letztendlich das Zusammen-

Der nachfolgende Beitrag fasst Resultate verschiedener Untersuchungen an KIT und BAW zusammen und setzt diese in Relation zu bestehenden Ansätzen zur Berechnung der Durchfluss-Fließtiefen-Beziehung in Fischauf-

stiegsanlagen. Untersuchungsergebnisse der Technischen Hochschule Lübeck (Klein und Oertel 2017, 2018) dienen dem Vergleich mit unabhängigen Daten.

## 2 Bestehende Berechnungsansätze

In der Literatur existieren verschiedene Ansätze zur Berechnung der Durchfluss-Fließtiefen-Beziehung eines Schlitzpasses. Eine Übersicht findet sich beispielsweise in Sokoray-Varga et al. (2015) oder in Klein und Oertel (2017). Nachfolgend wird auf relevante Ansätze eingegangen, wobei der Schwerpunkt auf dem in DWA (2014) publizierten Ansatz (siehe auch Krüger et al. 2010) liegt, da dieser in der Planungspraxis in Deutschland häufig Anwendung findet.

Die grundlegende Erkenntnis der bisherigen Untersuchungen zur Durchflusskapazität von Schlitzpässen ist, dass der Durchfluss  $Q$  und eine definierte, in einem praxisrelevanten Bereich liegende Fließtiefe in den Becken  $h$  für den gleichförmigen Abflusszustand in einem linearen Verhältnis zueinander stehen (u. a. Rajaratnam et al. 1986, 1992 Puertas et al. 2004, Sokoray-Varga et al. 2015). Exemplarisch sei der Ansatz von Wang et al. (2010) aufgeführt:

$$Q = C_{md} \cdot h_m \cdot s \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h_N} \quad (1)$$

Hierin ist  $C_{md}$  ein Durchflussbeiwert, welcher sich für die untersuchte Beckengeometrie in Wang et al. (2010) für unterschiedliche Durchflüsse als konstant erwies,  $s$  ist die Schlitzweite,  $g$  die Erdbeschleunigung und  $h_m$  die mittlere Fließtiefe in den Becken. Ein wichtiger Parameter für die Bemessung von Schlitzpässen ist die Wasserspiegeldifferenz zweier aufeinanderfolgender Becken. Verschiedene Studien (Rajaratnam et al. 1986, Wu et al. 1999, Puertas et al. 2004, Sokoray-Varga et al. 2015) zeigen, dass die Wasserspiegellagen von einem Minimum hinter der Trennwand auf ein Maximum direkt vor der Trennwand ansteigen. Die tatsächlich in einer Fischaufstiegsanlage an einer Trennwand auftretende Wasserspiegeldifferenz  $\Delta h_R$  ist demnach von einer theoretischen, für die Bemessung relevanten, nominellen Wasserspiegelspiegeldifferenz  $\Delta h_N$  zu unterscheiden, da diese von einem horizontalen Wasserspiegel innerhalb der Becken ausgeht (Bild 2). Die no-

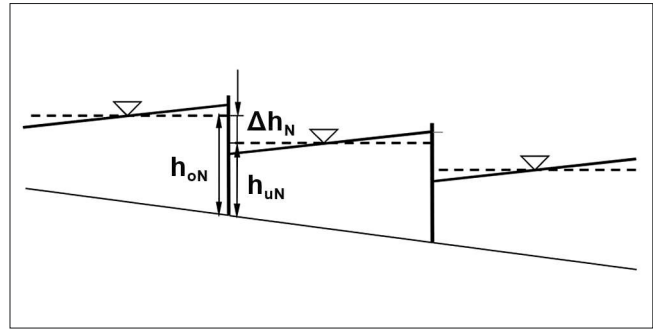


Bild 2: Schematischer Längsschnitt durch einen Schlitzpass mit der Definition des theoretischen horizontalen Wasserspiegels (gestrichelte Linie) und des in Realität tatsächlich geneigten Wasserspiegels (durchgezogene Linie)

minellen Fließtiefen  $h_{oN}$  und  $h_{uN}$  bezeichnen die auf den horizontalen Wasserspiegel bezogenen Fließtiefen direkt oberhalb und unterhalb der Trennwand.

In Deutschland ist das Standardwerk zur Bemessung von Fischaufstiegsanlagen das DWA-Merkblatt 509 (2014). Der dort empfohlene Berechnungsansatz lautet:

$$Q = \mu_v \cdot s \cdot \sqrt{g} \cdot h_{oN}^{3/2} = \mu_v \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot h_{oN} \cdot s \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_{oN}} \quad (2)$$

Zur Bestimmung des Durchflusskoeffizienten  $\mu_v$  wird in DWA (2014) ein funktionaler Zusammenhang zu den Fließtiefen  $h_{oN}$  und  $h_{uN}$  ober- bzw. unterhalb der Trennwand zweier aufeinanderfolgender Becken gegeben, wobei strömungsstabile und strömungsdissipierende Verhältnisse unterschieden werden. Für eine Definition dieser beiden Strömungsmuster wird auf den Beitrag von Höger et al. „Auftreten und Ausbildung von Strömungsmustern in Schlitzpässen“ (in diesem Heft) verwiesen. Für strömungsstabile Verhältnisse (Strömungsmuster 1, SM 1) gilt:

$$\mu_v = 0,48 \cdot \left( 1 - \left[ \frac{h_{uN}}{h_{oN}} \right]^{4,5} \right)^{0,60} \quad (3a)$$

Für strömungsdissipierende Verhältnisse (Strömungsmuster 2, SM 2) wird angegeben:

$$\mu_v = 0,59 \cdot \left( 1 - \left[ \frac{h_{uN}}{h_{oN}} \right]^{4,5} \right)^{0,48} \quad (3b)$$

Auch wenn die Gleichungen 2 sowie Gleichungen 3a und 3b nicht linear sind, gibt deren Kombination ebenfalls den linearen Zusammenhang zwischen Durchfluss und Fließtiefe wieder. Wichtig für die Anwendung des Ansatzes nach DWA (2014) ist, dass sich  $h_{oN}$  und  $h_{uN}$  auf die theoretischen, horizontalen Wasserspiegellagen beziehen. Als Gültigkeitsbereich wird für die Gleichungen

$$\frac{h_{uN}}{h_{oN}} = 0,5 \text{ bis } 0,99$$

und

$$h_u > 2 \cdot s$$

genannt.

### 3 Datengrundlage

Wesentliche Grundlage für die hier vorgestellten Analysen sind Untersuchungen, die an Versuchsrinnen am KIT und an der BAW durchgeführt wurden. Nähere Informationen zu Versuchsaufbau und -durchführung finden sich in Höger et al. (2014) und Sokoray-Varga et al. (2015). Grundsätzlich wurde darauf geachtet, dass die Untersuchungen den in DWA (2014) beschriebenen Parameterbereich für das Rinnengefälle und die Beckengeometrie abdecken. Eine wesentliche Unterscheidung der beiden Versuchsreihen liegt in der unterschiedlichen Gestaltung der Schlitzte. Während in den Untersuchungen an der KIT-Rinne ein scharfkantiger Schlitz zum Einsatz kam, sind die Schlitzte in der BAW-Rinne abgerundet. Des Weiteren wurden die Versuche in der KIT-Rinne ohne Sohlrauheit durchgeführt, wohingegen an der BAW drei unterschiedliche Bedingungen vorlagen: ohne Sohlrauheit (glatt), mit einer idealisierten Sohlrauheit in Form von Halbkugeln und mit Granitschotter.

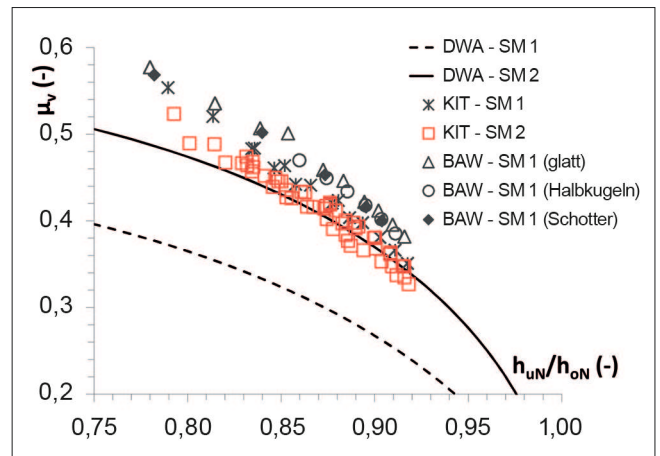


Bild 3: Vergleich des Ansatzes aus DWA (2014) mit den KIT/BAW-Daten unterschieden nach Strömungsmuster (SM 1 = strömungss stabil, SM 2 = strömungsdissipierend)

### 4 Vergleich der BAW/KIT-Daten mit dem Ansatz nach DWA (2014)

In einem ersten Schritt werden die vorhandenen Datensätze mit dem in DWA (2014) beschriebenen Berechnungsansatz (Gleichungen 2 und 3a/b) verglichen. In Bild 3 wird dabei die in DWA (2014) gewählte Darstellung übernommen, die den Durchflussbeiwert  $\mu_v$  in Funktion des Verhältnisses der nominellen Fließtiefen  $h_{uN}/h_{oN}$  zeigt.

Bild 3 zeigt, dass eine Differenzierung der Daten nach Strömungsmustern, wie es DWA (2014) vorschlägt, möglich ist, auch wenn die Daten nur teilweise zu dem dort vorgestellten Ansatz (Gleichungen 2 und 3) passen. Während eine relativ gute Übereinstimmung zwischen Gleichung 3b und den Daten mit Strömungsmuster 2 (SM 2) vorliegt, ergibt sich für die Daten mit Strömungsmuster 1 (SM 1) keine Übereinstimmung zur Gleichung 3a. Bild 3 zeigt für SM 1 der KIT-Daten sogar einen höheren Durchflussbeiwert als für SM 2, eine Tendenz, die der Prognose des Ansatzes aus DWA (2014) entgegensteht, da der Graph für strömungsdissipierende Verhältnisse nach Bild 3 über dem Graphen für strömungss stabile Verhältnisse liegt. Grundsätzlich gilt, dass ein höherer Durchflussbeiwert geringeren Verlusten in den Becken entspricht. Die in den KIT/BAW-Daten sichtbaren geringeren Verluste des SM 1 entsprechen daher eher den Erwartungen, da es das Ziel des SM 2 ist, möglichst

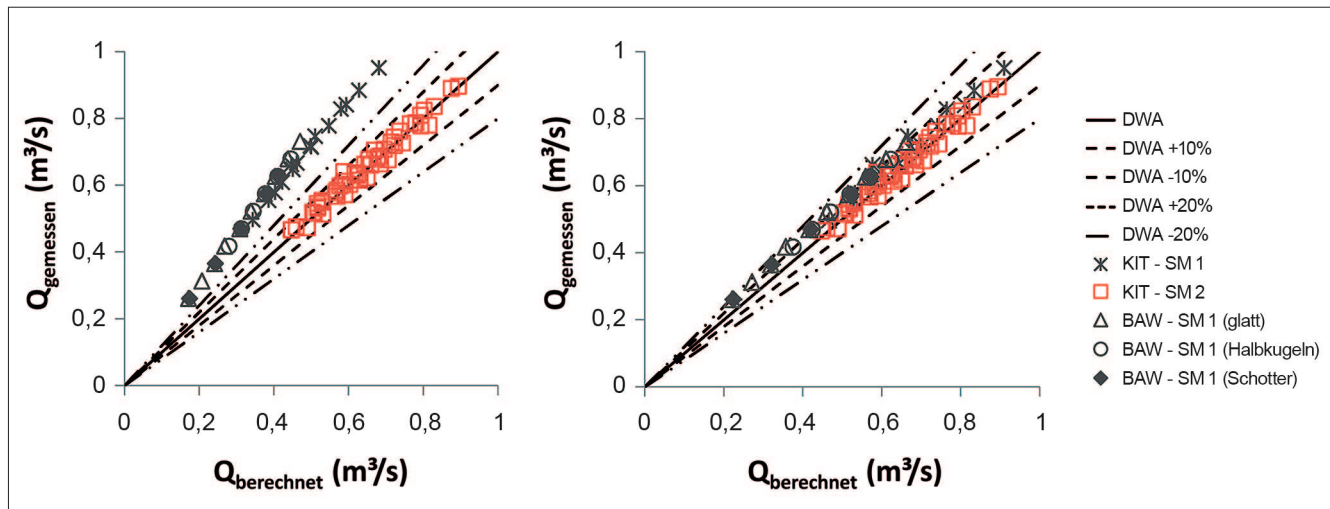


Bild 4: Vergleich der im Modell gemessenen Durchflüsse mit den nach DWA (2014) berechneten Durchflüssen; links: Differenziert nach Strömungsmuster; rechts: Auswertung nach Gleichung 3b (SM 2), unabhängig davon, welches Strömungsmuster tatsächlich beobachtet wurde

hohe hydraulische Verluste in den Becken zu erzeugen, um die Geschwindigkeiten im Schlitz gering zu halten.

Weiterhin lassen sich in Bild 3 für SM 1 Unterschiede zwischen den KIT und den BAW-Daten erkennen. Dieses lässt sich überwiegend mit der unterschiedlichen Ausrundung der eingebauten Geometrien im Schlitzbereich erklären. Formverluste im Schlitzbereich entstehen im Wesentlichen durch Strömungsablösungen, wobei dies durch scharfkantige Geometrien unterstützt wird. Infolgedessen bewirken scharfkantige Geometrien höhere Verluste und geringere Durchflussbeiwerte.

In Bild 4 (links) ist der Vergleich zwischen dem in den Versuchen gemessenen Betriebsdurchfluss  $Q_M$  und dem nach DWA (Gleichungen 2 und 3a/b) für eine jeweils gemessene Fließtiefe berechneten Durchfluss  $Q_B$  dargestellt, wobei auf Naturgrößen umgerechnet wurde. Das Bild zeigt, dass der Ansatz aus DWA (2014) für die KIT/BAW-Daten mit SM 1 keine sinnvollen Ergebnisse liefert. Für die Daten mit SM 2 liegt die Genauigkeit des Ansatzes nach DWA (2014) hingegen in einem guten Bereich von  $\pm 10\%$ .

Bild 4 (rechts) zeigt eine analoge Auswertung, mit dem Unterschied, dass der Ansatz nach DWA (2014) ausschließlich für das strömungsdissipierende Muster (Gleichung 3b) angewandt wird, unabhängig vom tatsächlich beobachteten Strömungsmuster. Es zeigt sich, dass die Genauigkeit des DWA-Ansatzes nun bei etwa  $\pm 20\%$  liegt.

Im Gegensatz zu den deutlich wahrnehmbaren Unterschieden für verschiedene Strömungsmuster (und damit Geometrien) ist der Effekt der Rauheit der Sohle nach Bild 3 und Bild 4 vergleichsweise gering, wobei anzumerken ist, dass für die Versuche mit Halbkugeln und Granitschotter der Nullhorizont der Sohle 25 % unterhalb der Höhe der Rauheitsspitzen angesetzt wurde. Hydraulische Verluste werden häufig in Reibungs- und Formverluste unterschieden. In Schlitzpässen dominieren die Formverluste aus den turbulenten Wirbelstrukturen im Becken sowie der Um- und Durchströmung im Bereich der Trennwände (siehe auch Bild 1) deutlich über dem Reibungswiderstand der Berandungen. Weitere Ausführungen zu diesem Thema finden sich im Beitrag von Sokoray-Varga et al. „Der Einfluss von Sohl- und Wandrauheit auf die Hydraulik von Schlitzpässen“ (in diesem Heft).

## 5 Analyse der KIT/BAW-Daten

Im Folgenden werden die KIT/BAW-Daten analysiert. Als charakteristische Fließtiefe in den Becken wird die theoretische Fließtiefe unterhalb der Trennwand  $h_{uN}$  verwendet. Diese Fließtiefe geht von der Modellvorstellung eines horizontalen Wasserspiegels in den Becken aus (siehe auch Bild 2). Da der Wasserspiegel in Realität geneigt ist (in Fließrichtung in einem Becken zunehmend, z. B.



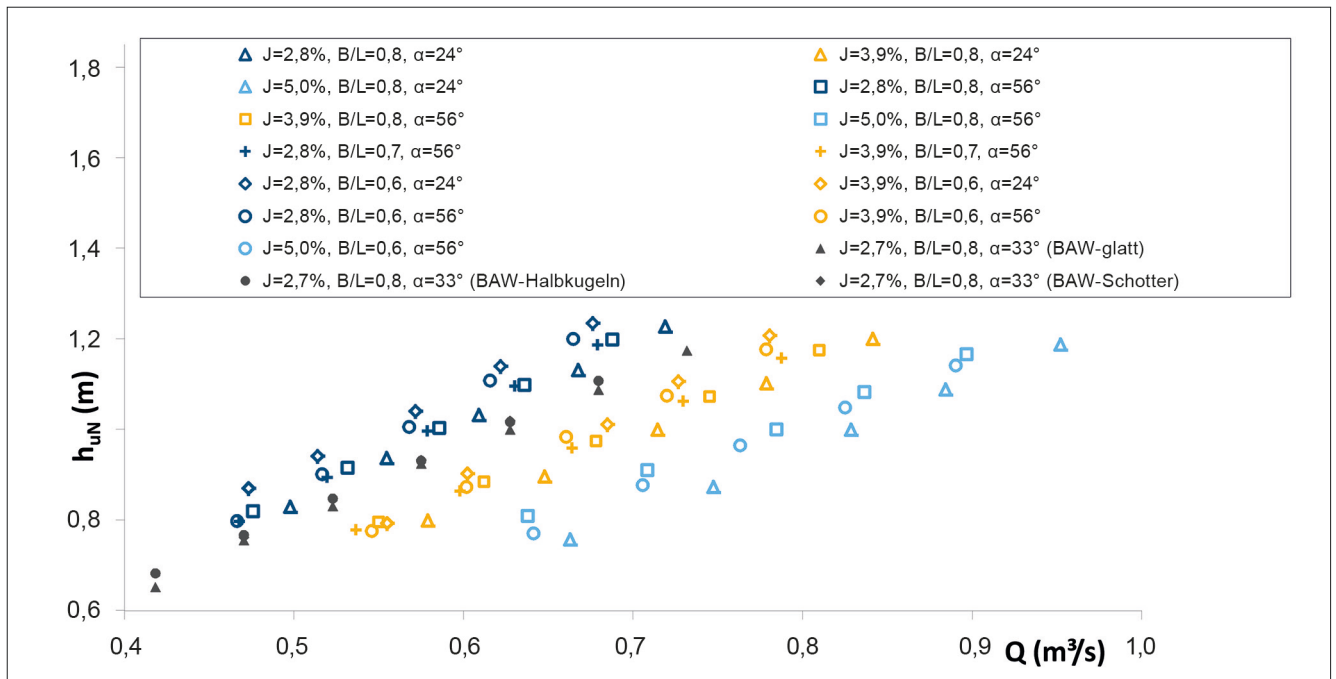


Bild 5: Linearer Zusammenhang zwischen Durchfluss und Fließtiefe der KIT/BAW-Versuche

Puertas et al. 2004) und von der jeweiligen Geometrie und der Wasserspiegeldifferenz an der oberhalb gelegenen Trennwand abhängt, entspricht die Fließtiefe  $h_{uN}$  keiner in einer Fischaufstiegsanlage vorhandenen, klar definierten oder messbaren Größe. Nichtsdestotrotz stellt  $h_{uN}$  eine sinnvolle Größe bei der Planung einer Fischaufstiegsanlage dar, da der reale Wasserspiegelverlauf im Vorhinein nicht bekannt ist. Außerdem wird in der Regel über die biologisch erforderliche Mindestfließtiefe und dem horizontalen Unterwasserspiegel bei einem  $W_{30}$  die Sohlenlage des Einstiegs der Fischaufstiegsanlage dimensioniert, was letztendlich dem Parameter  $h_{uN}$  des untersten Beckens entspricht. In den Untersuchungen an KIT und BAW wurde die theoretische, horizontale Wasserspiegellage anhand einer aus Messwerten abgeleiteten mittleren Fließtiefe berechnet.

Bild 5 zeigt, dass für die Daten der KIT/BAW-Versuche der in der Literatur beschriebene lineare Zusammenhang zwischen Durchfluss und Fließtiefe gilt. Weiterhin ist deutlich eine Gefälleabhängigkeit zu erkennen (unterschiedliche Farben in Bild 5), d. h., je steiler die Fischaufstiegsanlage, desto mehr Durchfluss ist zu erwarten. Der Effekt des Gefälles überwiegt dabei deutlich über den getesteten geometrischen Änderungen, welche im Wesentlichen eine Variation des Verhältnisses Beckenbreite zu Beckenlänge ( $B/L$ ) wie auch der Ausrichtung

des Umlenkblocks (Schlitzwinkel  $\alpha$ ) waren. Die geometrischen Änderungen machen sich zudem über das Strömungsmuster bemerkbar, d. h., sobald die Änderungen stark genug sind, um ein Umschlagen in ein anderes Strömungsmuster zu bewirken (siehe Beitrag von Höger et al. „Auftreten und Ausbildung von Strömungsmustern in Schlitzpässen“ in diesem Heft), ist auch ein Effekt auf die hydraulischen Verluste (und damit auf den Durchfluss) messbar. Die Versuche in der BAW-Rinne mit glatter und rauher Sohle zeigen in Bild 5 sehr ähnliche Durchflüsse. Ein Effekt, der verdeutlicht, dass die wesentlichen hydraulischen Verluste aus der Turbulenz im Becken sowie Strömungsablösungen im Bereich der Trennwände resultieren.

In Bild 6 wird der dargestellten Gefälleabhängigkeit (über den Parameter  $\Delta h_N$ ) Rechnung getragen und der Durchfluss  $Q$  durch den Term

$$\sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h_N} \cdot s^2 \text{ dividiert, d. h. } Q^* = Q / \left( \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h_N} \cdot s^2 \right)$$

und entsprechend der beobachteten Strömungsmuster gegen  $h^* = h_{uN}/s$  aufgetragen. Die KIT-Daten werden hierbei nicht wie in Bild 5 nach den verschiedenen untersuchten Geometrien differenziert, sondern nur noch gemäß des beobachteten Strömungsmusters unterschieden. Für den Zusammenhang zwischen Schlitzpassgeo-

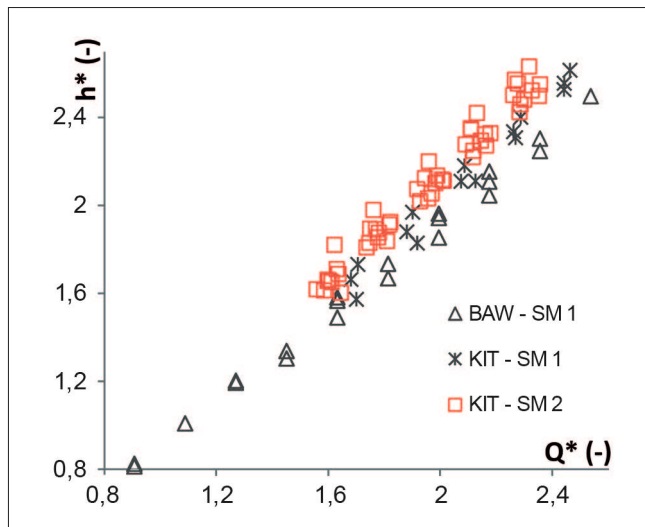


Bild 6: Linearer Zusammenhang zwischen normiertem Durchfluss  $Q^*$  und normierter Fließtiefe  $h^*$  der Versuche an KIT und BAW

metrie und Strömungsmuster wird auf den Beitrag von Höger et al. „Auftreten und Ausbildung von Strömungsmustern in Schlitzpässen“ (in diesem Heft) verwiesen. Die BAW-Daten mit rauer bzw. glatter Sohle sind aufgrund der geringen festgestellten Unterschiede in Bild 6 ebenfalls zusammen dargestellt.

Die KIT-Daten in Bild 6 zeigen, dass ein geringer Einfluss des Strömungsmusters (d. h. der Beckengeometrie) auf den Q-h-Zusammenhang ebenso existiert wie ein Einfluss der Schlitzgestaltung (BAW-Daten für SM 1 mit rundem Schlitz und KIT-Daten SM 1 mit scharfkantigem Schlitz).

Im Folgenden wird ein linearer Ansatz aus den KIT/BAW-Daten entwickelt, indem mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate der empirische Zusammenhang zwischen  $Q^*$  und  $h^*$  ermittelt wird. Im Rahmen der vorliegenden Auswertung wird hierbei auf eine Differenzierung nach Strömungsmuster und Schlitzgestaltung verzichtet. Dieses erhöht den Anwendungsbereich des Ansatzes auf Kosten seiner Genauigkeit. Demnach ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen dem Durchfluss  $Q$  und der Fließtiefe  $h_{uN}$ :

$$Q = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h_N} \cdot s \cdot (0,9 \cdot h_{uN} + 0,2 \cdot s) \quad (4)$$

Der Gültigkeitsbereich der Gleichung orientiert sich an den im DWA empfohlenen Geometrien eines Schlitzpasses, welche in den Modellversuchen an KIT und BAW umgesetzt wurden. Wie in Bild 6 zu erkennen, liegt die Anwen-

dungsgrenze der Gleichung in Bezug auf den Parameter  $h^* = h_{uN}/s$  bei  $h_{uN}/s > 0,8$ , während diese beim Ansatz nach DWA (2014) mit  $h_{uN}/s > 2$  angegeben wird. Die Untersuchungen an KIT/BAW wurden dabei für Verhältnisse ausgerichtet, wie sie an Bundeswasserstraßen vorkommen, d. h., die geometrischen (Schlitzweite) und hydraulischen (Fließtiefe, Wasserspiegeldifferenz zwischen den Becken) Parameter orientieren sich an den DWA-Vorgaben zur Kaulbarsch-Flunder-, Brachsen- und Barbenregion.

## 6 Diskussion der Untersuchungsergebnisse

Interessant ist ein qualitativer Vergleich der Ansätze nach DWA (Gleichung 2/3) und KIT/BAW (Gleichung 4). Zum einen wird deutlich, dass der KIT/BAW-Ansatz den linearen Zusammenhang zwischen Durchfluss und Fließtiefe direkt wiedergibt, was zu einer einfachen Anwendung des Ansatzes führt. So erfordern Gleichung 2 und 3 nach DWA (2014) eine doppelte Iteration für den rückgestauten Fall einer Fischaufstiegsanlage. Bei dem hier vorgestellten KIT/BAW-Ansatz kann hingegen der Q-h-Zusammenhang im rückgestauten Fall mit einfacher Iteration durchgeführt werden.

Weiterhin lässt sich erkennen, dass Gleichung 4 (im Gegensatz zu den Gleichungen 2 und 3) nicht durch den Nullpunkt verläuft (für  $h_{uN} = 0$  m ist  $Q \neq 0$  m<sup>3</sup>/s), was ohne Beachtung des Gültigkeitsbereichs für sehr kleine Fließtiefen zu fehlerhaften Ergebnissen führt. Diese vermeintliche Unzulänglichkeit ist bei näherer Betrachtung jedoch sinnvoll. Für sehr kleine Fließtiefen ist nicht davon auszugehen, dass die in vielen Untersuchungen bestätigte Erkenntnis eines linearen Zusammenhangs zwischen Fließtiefe und Durchfluss in einem Schlitzpass Gültigkeit besitzt. Vielmehr werden bei großen Verhältnissen von  $\Delta h_N/h_{uN}$  andere, dreidimensionale Strömungsprozesse wie auch der Einfluss der Sohle an Bedeutung gewinnen. Ein linearer Ansatz, welcher durch den Nullpunkt gezwungen wird, wird dann jedoch für den relevanten Bereich von Fließtiefe und Durchfluss zwangsläufig Abweichungen vom tatsächlichen Wert erzeugen. Es wird daher ein linearer Ansatz im praxisrelevanten Bereich mit klarer Beschränkung der Gültigkeit als zielführend angesehen.

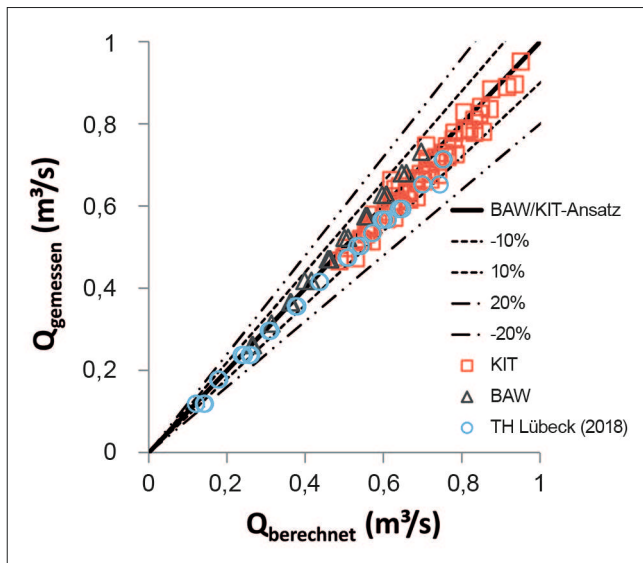


Bild 7: Vergleich der im Modell gemessenen Durchflüsse mit den nach Gleichung 4 berechneten Durchflüssen, zusätzlich Vergleich mit den Daten nach Klein und Oertel (2017, 2018)

Bild 7 zeigt den Vergleich zwischen dem in den Versuchen gemessenen Betriebsdurchfluss  $Q_M$  und dem mit Gleichung 4 berechneten Durchfluss  $Q_B$ . Gleichung 4 gibt demnach die Daten in einer Genauigkeit von circa  $\pm 10\%$  für alle Geometrievarianten wieder. Die vorhandene Streuung der Daten spiegelt letztendlich die Unterschiede der untersuchten Modellvarianten wider (im Wesentlichen Strömungsmuster und Schlitzgestaltung), welche nicht als Parameter in den hier vorgestellten Ansatz (Gleichung 4) eingeflossen sind. Weiterhin wurden die Versuche von Klein und Oertel (2017, 2018) hinzugezogen, die in einer Rinne an der TH Lübeck ebenfalls auf Basis der im DWA vorgeschlagenen Geometrien den Zusammenhang zwischen Durchfluss und Fließtiefe untersuchten. Diese unabhängigen Rinnendaten bestätigen in der Grundtendenz die Ergebnisse nach Gleichung 4, wenn auch die gemessenen Durchflusswerte tendenziell unter den prognostizierten Werten liegen. Dieses kann mit Unterschieden in der Ausgestaltung der Geometrien der Becken in den Untersuchungen in Lübeck erklärt werden. Der Vergleich mit anderen zur Verfügung stehenden Datensätzen aus Laborversuchen (z. B. Wang et al. 2010, Rajaratnam et al. 1986, 1992) wurde hier nicht als zielführend angesehen, da diese Daten nicht den in DWA (2014) empfohlenen Geometrien entsprachen oder am Einzelschlitz entstanden sind.

Aufschlussreich ist ein Vergleich des aus den KIT/BAW-Daten abgeleiteten linearen Ansatz mit dem ebenfalls

gut passenden Ansatz aus DWA (2014) für das strömungsdissipierende Muster (Gleichungen 2 und 3b). So wird für das Berechnungsbeispiel aus dem Merkblatt 509 (DWA 2014) (mit  $s = 0,30$  m,  $\Delta h_N = 0,16$  m,  $h_{uN} = 0,70$  m) ein Durchfluss für den gleichförmigen Abflusszustand von  $Q = 0,35$  m³/s angegeben. Die Berechnung mit dem vorgeschlagenen Ansatz ergibt einen ähnlichen Wert von  $Q = 0,37$  m³/s. Für größere Fließtiefen und Schlitzweiten werden die Unterschiede zwischen den beiden Ansätzen größer, die Ergebnisse befinden sich jedoch immer noch in einem ähnlichen Bereich. Ein Berechnungsbeispiel für typische Verhältnisse an Bundeswasserstraßen (mit  $s = 0,45$  m,  $\Delta h_N = 0,14$  m,  $h_{uN} = 1,20$  m) zeigt, dass mit dem KIT/BAW-Ansatz ein Durchfluss von  $Q = 0,87$  m³/s zu erwarten wäre, während der Ansatz nach DWA (2014) einen Wert von  $Q = 0,82$  m³/s liefert.

Diese Angaben beziehen sich auf den gleichförmigen Abflusszustand, eine Situation, die für die Bemessung der Fischaufstiegsanlage wichtig ist, jedoch nicht häufig auftritt. Stattdessen dominiert im Bemessungszeitraum zwischen  $Q_{30}$  und  $Q_{330}$  der ungleichförmige Abflusszustand, d. h., die Fischaufstiegsanlage wird vom Unterwasser her eingestaut, die Wasserspiegeldifferenzen zwischen den Becken nehmen von unten nach oben zu, die Fließtiefe von unten nach oben hin ab. Betrachtet man das Beispiel in DWA (2014) für den rückgestauten Fall, ergibt sich für einen um 90 cm erhöhten Unterwasserstand und einen um 20 cm erhöhten Oberwasserstand des obigen Berechnungsbeispiels ein Durchfluss von  $Q = 0,44$  m³/s. Die Anwendung von Gleichung 4 ergibt einen Wert von  $Q = 0,46$  m³/s.

## 7 Schlussfolgerungen und Empfehlungen für die Praxis

Die Untersuchungen an KIT und BAW wie auch die Versuche an der TH Lübeck bestätigen den linearen Zusammenhang zwischen Durchfluss und Fließtiefe in einem Schlitzpass, d. h., im Rahmen des praxisrelevanten Anwendungsbereichs führt beispielsweise eine doppelt so große Fließtiefe in den Becken nahezu zu einem doppelt so großen Durchfluss in der Anlage. Dieser lineare Zusammenhang wie auch die Ergebnisse der Untersuchungen mit glatter und rauer Sohle zeigen, dass der Einfluss



der Rauheit der Sohle in einem Schlitzpass vergleichsweise gering ist.

Neben der Sohlrauheit wurden in den Versuchen im Wesentlichen das Gefälle, die Geometrie der Becken (und damit das Strömungsmuster) sowie die Ausgestaltung der Schlitzte variiert. Es zeigt sich, dass die genannten Parameter eine Rolle für den Zusammenhang zwischen Durchfluss und Fließtiefe spielen, wobei insbesondere das Gefälle (bzw. der Wasserspiegelunterschied zwischen den Becken  $\Delta h_N$ ) wesentlich auf die Resultate einwirkt und demnach in der Ableitung eines Berechnungsansatzes zwingend zu berücksichtigen ist.

Der Vergleich der KIT/BAW-Daten mit dem in DWA (2014) empfohlenen Ansatz zeigt ein differenziertes Bild. Die DWA-Gleichung für das strömungsstabile Strömungsmuster (SM 1) führt nicht zu brauchbaren Ergebnissen, wohingegen die Gleichung für das strömungsdissipierende Strömungsmuster (SM 2) grundsätzlich solide Resultate liefert. Einfacher in der Anwendung ist die aus den hier vorgestellten Daten abgeleitete Gleichung

$$Q = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h_N} \cdot s \cdot (0,9 \cdot h_{uN} + 0,2 \cdot s)$$

zur Berechnung des Durchflusses. Neben der Fließtiefe  $h_{uN}$  unterhalb der Trennwand, welche sich für den Bemessungsfall eines  $W_{30}$  aus der biologisch erforderlichen Mindesttiefe ermitteln lässt, gehen in diesen Ansatz die Schlitzweite  $s$ , die Erdbeschleunigung  $g$  und die Wasserspiegeldifferenz  $\Delta h_N$  zwischen den Becken ein. Der Gültigkeitsbereich der Gleichung bezieht sich dabei auf den Anwendungsbereich des Merkblatts 509 (DWA 2014) hinsichtlich der dort empfohlenen Geometrien, Mindestfließtiefen und Gefällebereiche für die Kaulbarsch-Flunder-, Brachsen- und Barbenregion. Eine darüber hinausgehende Anwendung der Gleichung (Äschenregion und obere und untere Forellenregion) kann brauchbare Ergebnisse liefern, ist jedoch nicht durch Versuche an KIT/BAW nachgewiesen. Ein direkter Vergleich beider Ansätze zeigt, dass Abweichungen existieren, grundsätzlich jedoch ähnliche Ergebnisse produziert werden. Der Vorteil des hier vorgestellten Ansatzes ist dessen Einfachheit. Während die Gleichungen nach DWA (2014) eine doppelte Iteration im rückgestauten Fall erfordern, ist der KIT/BAW-Ansatz für den rückgestauten Fall mit einfacher Iteration anwendbar. Eine Differenzierung nach Strömungsmustern ist nicht erforderlich, auch wenn eine

Prognose des Strömungsmusters möglich wäre (siehe im Beitrag von Höger et al. „Auftreten und Ausbildung von Strömungsmustern in Schlitzpässen“ in diesem Heft).

Der hier vorgestellte Ansatz wie auch die große Mehrheit vorhandener Datensätze in der Literatur basieren auf Versuchen in geraden Versuchsrinnen mit Abfolgen gleicher Becken. In realisierten Schlitzpässen kommen häufig auch Becken zum Einsatz, die von den Standardmaßen abweichen, wie etwa Wendebecken, kanalartige Abschnitte oder geknickte Becken. Weiterhin lässt sich in Modellversuchen beobachten, dass sich die Wasserspiegeldifferenzen an der ersten und der letzten Trennwand von den Verhältnissen in der Anlage unterscheiden. Dieser Tatsache wird in Modelluntersuchungen begegnet, indem die mittleren Becken, in denen ein gleichförmiger Abflusszustand herrscht, betrachtet werden. Je nach Anzahl der Becken und Gestaltung der Fischaufstiegsanlage weichen demnach die realen Verhältnisse mehr oder weniger stark von den idealisierten Modellbetrachtungen ab. Für eine Weiterentwicklung der Ansätze ist die Validierung mit Naturdaten ein wichtiger nächster Schritt.

Die Genauigkeit des hier vorgestellten Ansatzes, wie auch anderer bekannter Berechnungsansätze, sollte in der Praxis nicht überbewertet werden. Die detaillierte Ausgestaltung des Schlitzes, die Sensitivität der Strömungsmuster und das Abweichen der Situation an realen Anlagen von idealen Laborbedingungen führen dazu, dass die Genauigkeit der Ansätze von uns in einem Bereich von etwa  $\pm 15\%$  geschätzt wird.

## 8 Literatur

DWA (2014): Merkblatt 509, Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke – Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Hg.), Hennef.

Höger, V.; Henning, M.; Nestmann, F. (2014): Experimental Study on the Influence of Pool Geometry on Flow Patterns in Vertical-Slot Fishways. In: Proceedings of the 10th International Symposium on Ecohydraulics, Trondheim.

- Höger, V.; Seidel, F.; Nestmann, F. (2020): Auftreten und Ausbildung von Strömungsmustern in Schlitzpässen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): BAWMitteilungen Nr. 106, Karlsruhe: BAW, S. 15-22.
- Klein, J.; Oertel, M. (2017): Untersuchung von Einflussparametern auf die Abflussbemessung von Fischaufstiegsanlagen in Schlitzbauweise. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Bemessung im Wasserbau – Klimaanpassung, Untersuchungen, Regeln, Planung, Ausführung. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 58. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 291–300.
- Klein, J.; Oertel, M. (2018): Influence of Inflow and Outflow Boundary Conditions on Flow Situation in Vertical Slot Fishways. In: 7<sup>th</sup> IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, Aachen, Germany, 15–18 May. Doi: 10.15142/T3SW73 (978-0-692-13277-7).
- Krüger, F.; Heimerl, S.; Seidel, F.; Lehmann, B. (2010): Ein Diskussionsbeitrag zur hydraulischen Berechnung von Schlitzpässen. In: WasserWirtschaft, 100/3, S. 30–36.
- Puertas, J.; Pena, L.; Teijeiro, T. (2004): Experimental Approach to the Hydraulics of Vertical Slot Fishways. In: Journal of Hydraulic Engineering 130, pp. 10–23.
- Rajaratnam, N.; Van der Vinne, G.; Katopodis, C. (1986): Hydraulics of vertical slot fishways. In: Journal of Hydraulic Engineering 112, Nr. 10, pp. 909–927.
- Rajaratnam, N.; Katopodis, C.; Solanki, S. (1992): New designs for vertical slot fishways. In: Canadian Journal of Civil Engineering 19, pp. 402–414.
- Sokoray-Varga, B.; Weichert, R.; Nestmann, F. (2015): Untersuchungen zu hydraulischen Berechnungsansätzen von Schlitzpässen. In: WasserWirtschaft 105 (7–8), S. 61–66.
- Sokoray-Varga B.; Kerlin, T.; Prinz, F.; von Meltzer, J.; Musall, M.; Oberle, P.; Weichert, R. (2020): Der Einfluss von Sohl- und Wandrauheit auf die Hydraulik von Schlitzpässen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): BAWMitteilungen Nr. 106, Karlsruhe: BAW, S. 43-48.
- Wang, R.; David, L.; Larinier, M. (2010): Contribution of experimental fluid mechanics to the design of vertical slot fish passes. In: Knowl. Managt. Aquatic Ecosyst. 396, Nr. 2, pp. 1–21.
- Wu, S.; Rajaratnam, N.; Katopodis, C. (1999): Structure of flow in a vertical slot fishway. In: Journal of Hydraulic Engineering 125, Nr. 4, pp. 351–359.

